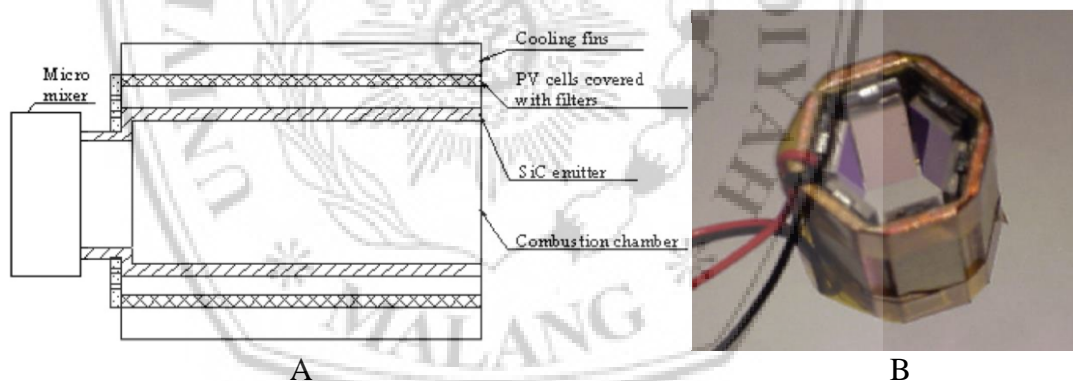


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Micro Power Generator dan Micro atau Meso-Scale Combustor*

*Micro power generator* adalah pembangkit listrik tenaga mikro dengan menggunakan sumber panas pembakaran sebagai sumber energi yang akan dikonversi menjadi energi listrik siap pakai dengan menggunakan *thermoelectric*. Pembangkit tenaga micro-TPV adalah jenis alat pengubah energi langsung, yang diamana menggunakan PV cells untuk mengubah radiasi panas dari pembakaran bahan bakar fosil, menjadi energi listrik (Chou, Yang, Chua, Li, & Zhang, 2011). Adapun sketsa dan *prototype* yang pernah dibuat dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.1 A. Sketsa micro power generator, B. Prototype micro silinder power generator TPV tanpa sayap pendingin.

Sumber : Chou, et al, 2011

Pembakaran diruang mikro menjadi sesuatu yang sangat menarik untuk dikembangkan akhir-akhir ini, untuk diterapkan pada *micropower generation*, *micropropulsion*, dan *micro-electro-mechanical system* (MEMS). *Microcombustor*

adalah pembakaran bahan bakar pada skala mikro, tetapi dalam masalah ukuran dibagi menjadi 2 yaitu *microscale* dengan besar skala kurang dari 1 mm, *mesoscale* dengan besar skala lebih dari 1 mm. Syarat *microscale combustion* yang digunakan untuk pembakaran ukurannya lebih kecil dari  $1 \times 10^{-3}$  m. Syarat *mesoscale combustion* yang digunakan untuk pembakaran ukurannya lebih dari 1 mm tetapi tetap memiliki ciri-ciri karakteristik dari *microscale combustion* (Maruta, 2011).

*Microcombustor* yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah jenis *mesoscale combustor* dengan diameter dalam 3,5 mm dan diameter luar 5 mm. Pada *combustor* akan disisipkan *flame holder* yang berguna sebagai tempat menempelnya api dan sebagai resirkulator panas. Adapun definisi dari *micro-scale* dan *meso-scale combustion* dapat dijelaskan secara lengkap pada tabel dibawah ini :

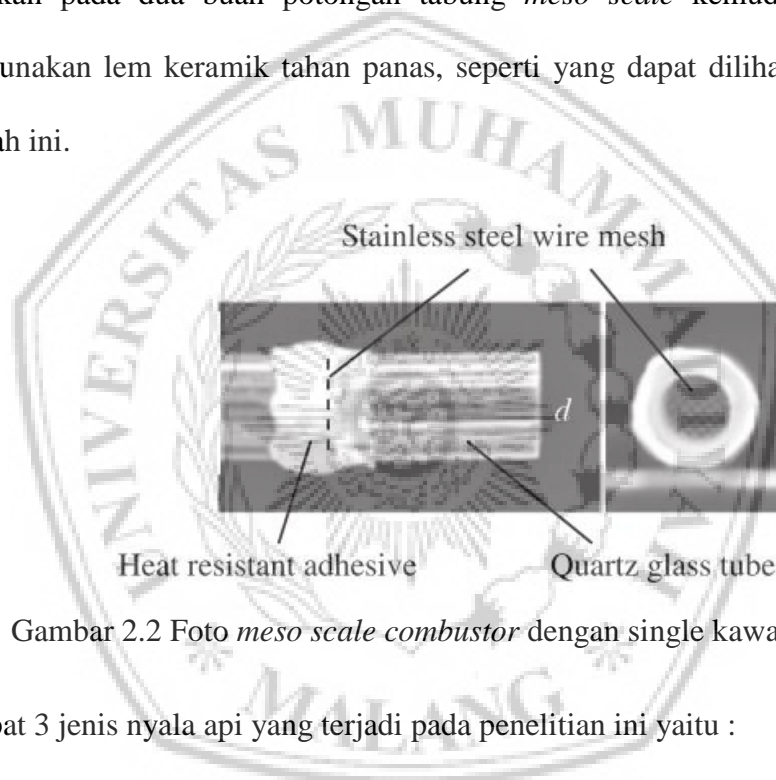
Tabel 2.1 Definsi *micro-scale* dan *meso-scale combustion* menggunakan perbedaan skala panjang

Definition based on	Combustion regime	Length scale	Examples	Applications
Physical length	Mesoscale	1–10 mm	Rotary engine (UCB)	MEMS power
Flame quenching diameter	Microscale	1–1000 $\mu\text{m}$	Micro-reactor (UIUC)	Thruster
	Mesoscale	~Quenching diameter (equilibrium)	Swiss-roll combustor (USC)	Power generation
	Microscale	Quenching diameter ~ Mean-free path (non-equilibrium)	Fuel Cells Nano-particle reactors	Energy conversion
Device scale	Microscale	Smaller than conventional engine size	Micro-thrusters (PSU) Micro-gas turbine (MIT)	Micro-satellites Micro-air planes

Sumber : Y. Ju, K. Maruta, 2011

## 2.2 Penelitian Sebelumnya

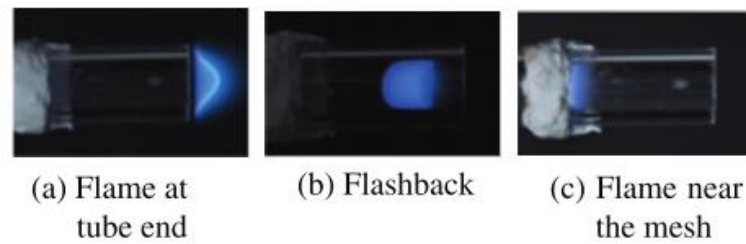
M. Mikami, Y. Maeda, K. Matsui et al (2013) telah melakukan penelitian experimental mengenai pembakaran bahan bakar gas dan cair pada tabung *meso scale* dengan kawat mesh. Pada penelitian ini tabung pembakaran diberi *flame holding* berupa kawat mesh, adapun diameter tabung *meso scale* menggunakan tiga jenis ukuran yang berbeda, yaitu 2,5 mm, 3,5 mm, dan 5,4 mm. Kawat mesh disisipkan pada dua buah potongan tabung *meso scale* kemudian direkatkan menggunakan lem keramik tahan panas, seperti yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



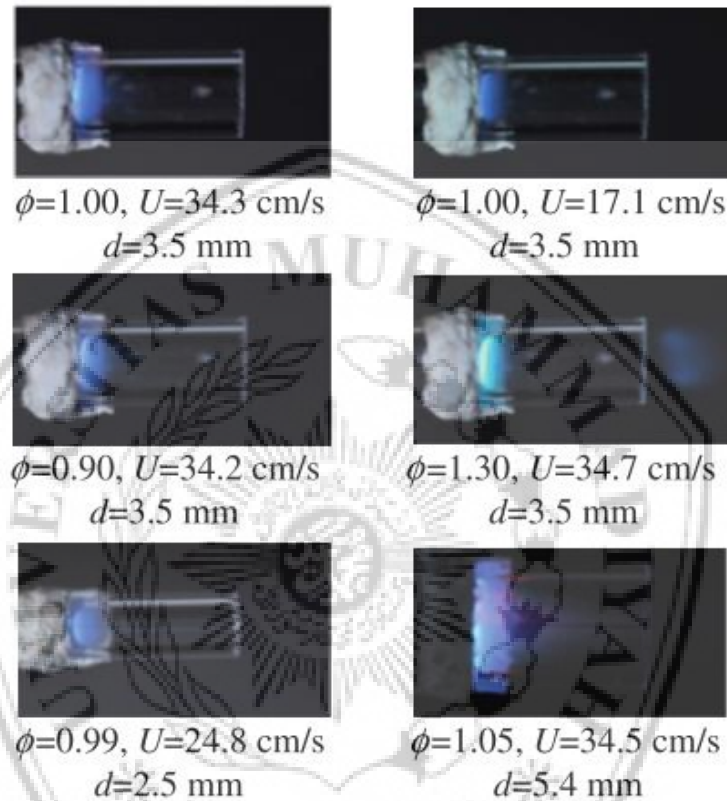
Gambar 2.2 Foto *meso scale combustor* dengan single kawat mesh.

Terdapat 3 jenis nyala api yang terjadi pada penelitian ini yaitu :

1. Nyala stabil pada ujung tabung.
2. Nyala *flashback*.
3. Nyala stabil pada mesh. Adapun penjelasan berupa gambar dari nyala api yang disebutkan diatas dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.3 Penampakan nyala api pada *meso scale combustor*.

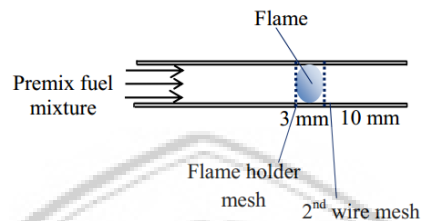


Gambar 2.4 Kestabilan nyala api dekat kawat mesh didalam tabung.

Sumber : Yuliati. L, 2014

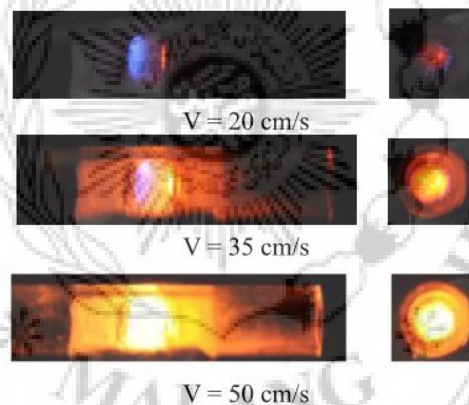
Yuliati, L (2014) telah melakukan penelitian experimental mengenai kestabilan nyala api pada *micro combustor* dengan penambahan media berpori, adapun combustor berbentuk silinder yang terbuat dari *quartz glass tube* dengan diameter dalam 3,5 mm dan diameter luar 5 mm. Pada bagian dalam *micro combustor* ini diberi dua buah kawat mesh yang terbuat dari stainless steel dimasukkan pada 10

mm dan 13 mm dari hilir *combustor*. Propana digunakan sebagai bahan bakar pada penelitian ini. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nyala api dapat stabil di dalam micro combustor antara dua kawat mesh dan area stabilitas di dalam *combustor* dengan kawat mesh ganda adalah lebih luas dari pada hanya menggunakan satu kawat mesh.



Gambar 2.5 Desain *Microcombustor* dengan penambahan *double wire mesh*.

Sumber : Yuliati, L, 2014

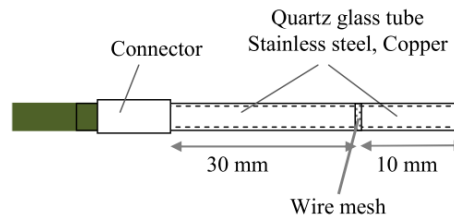


Gambar 2.6 Visualisasi nyala api pada berbagai kecepatan laju reaktan.

Sumber : Yuliati, L, 2014

Yuliati, et al (2014) telah melakukan penelitian tentang pengaruh konduktivitas termal dinding combustor terhadap flammability limit dan visualisasi nyala. Pada penelitian ini dinding combustor yang digunakan berjumlah 3 buah, yaitu quartz glass tube, stainless steel dan tembaga dengan diameter combustor sama dengan

penelitian sebelumnya. Adapun desain rancangan combustor dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.7 Detail desain meso-scale combustor dengan perbedaan konduktivitas termal dinding combustor.

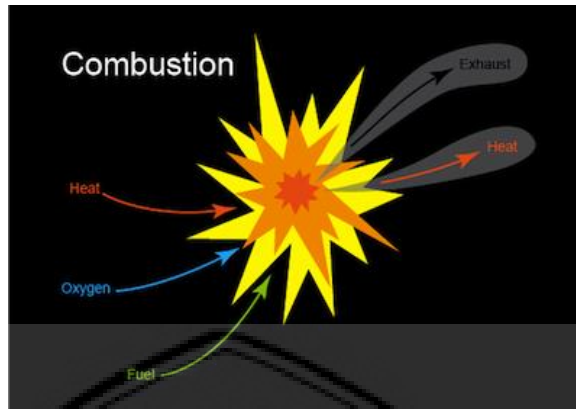
Pada penelitian ini menunjukkan bahwa dinding combustor dengan konduktivitas termal yang tinggi yaitu tembaga memiliki luas daerah flammability limit yang lebih luas dari pada quartz glass tube dan stainless steel.

### 2.3 Pembakaran

Pembakaran adalah suatu reaksi kimia beruntun relatif cepat antara hidrokarbon pada bahan bakar, oksigen di udara dengan energi aktivasi yang menghasilkan energi dalam bentuk panas. Pembakaran adalah reaksi kimia yang mana elemen-elemen tertentu berupa bahan bakar yang bercampur dengan oksigen menyebabkan peningkatan dalam temperatur gas (Maleev.V.L, 1989). Campuran bahan bakar dan oksigen dapat meyalah hanya diatas temperatur tertentu. Temperatur ini disebut sebagai temperatur nyala (Lejda & Wos, 2012).

Energi aktivasi adalah sejumlah energi minimum yang digunakan oleh suatu zat untuk dapat bereaksi hingga terbentuk zat baru, adapun energi aktivasi yang dipakai pada saat proses pembakaran adalah energi panas. Reaksi kimia yang terjadi pada saat pembakaran adalah reaksi eksoterm, karena pada saat proses pembakaran terjadi kenaikan suhu pada sistem. energi aktivasi dapat didefinisikan sebagai

energi minimum yang dibutuhkan A agar A menjadi produk . Secara singkat, proses pembakaran dapat diilustrasikan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.8 Ilustrasi dalam proses pembakaran.

Sumber : Anonymous 1

Gambar diatas dapat diketahui bahwa ketika proses pembakaran berlangsung bahan bakar dan oksigen berubah menjadi produk baru, produk baru ini berupa energi panas dan gas buang, adapun gas buang berupa  $\text{CO}_2$  atau  $\text{CO}$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Pembakaran dengan oksidator berupa oksigen diambil dari udara bebas, yang diketahui mengandung 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka gas buang dapat mengandung nitrogen oksida ( $\text{Nox}$ , nitrogen + oksigen), adapun tingginya Temperatur pembuangan dikarenakan panas hasil pembakaran ditransfer ke pembuangan selama proses pembakaran berlangsung, karena temperatur yang tinggi inilah sering menyebabkan pembuangan dari hasil pembakaran berupa gas. Temperatur dari pembuangan sangatlah tinggi karena panas ditransfer ke pembuangan selama pembakaran. Karena tingginya temperatur, pembuangan sering berwujud gas, tetapi dapat juga berupa cairan atau produk pembuangan berupa padatan yang disebut juga jelaga ( B. Zohur, R. Source, 2016).

### 2.3.1 Reaksi Kimia Pembakaran

Reaksi pembakaran dapat terjadi jika bahan bakar berupa senyawa yang terdiri dari karbon (C) dan hidrogen (H) bereaksi dengan oksigen yang berasal dari udara, dan menghasilkan produk berupa CO<sub>2</sub>, CO dan H<sub>2</sub>O, tetapi di lapangan semua senyawa itu tak dapat bereaksi tanpa adanya energi aktivasi, yaitu energi panas. Pada reaksi pembakaran selalu menghasilkan panas, dan reaksi ini disebut dengan proses oksidasi eksotermis. Adapun persamaan reaksi pembakaran secara sederhana dapat ditulis sebagai berikut :



Persamaan diatas dalam kenyataan sulit untuk terjadi, dikarenakan oksigen yang diambil pada setiap proses pembakaran kebanyakan dari udara bebas yang dimana bukan hanya oksigen saja yang terkandung didalamnya, adapun komposisi udara dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 2.2 Komposisi Udara Atmosfir

Udara	Symbols	Volume %
Nitrogen	N <sub>2</sub>	78,03
Oksigen	O <sub>2</sub>	20,99
Argon	A	0,94
Karbon dioksida	CO <sub>2</sub>	0,03
gas lain		0,01
<b>Total</b>		<b>100</b>

Sumber : International Critical Tables, vol 1, p. 393, McGraw-Hill Book

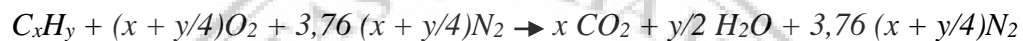
Company, Inc., New York, 1926.

dari tabel diatas didapatkan bahwa proporsi oksigen di udara adalah 20,99%, nitrogen 78,03%, dan sisanya berupa argon, CO<sub>2</sub> dll, karena jumlah gas lain sangat



kecil, jika diasumsikan kandungan nitrogen di udara 79% dan oksigen 21%, maka setiap penggunaan 1 mol oksigen maka penggunaan nitrogen adalah  $\frac{79}{21} = 3,761$  mol  $N_2$ .

Keadaan stoikiometri adalah keadaan dimana campuran udara dan bahan bakar memiliki jumlah yang tepat dalam bereaksi secara menyeluruh. Reaksi keadaan stoikiometri dapat terjadi jika seluruh atom C dan H berikatan dengan  $O_2$  secara keseluruhan. Adapun reaksi keadaan stoikiometri dapat dituliskan dibawah ini dengan berdasarkan penjelasan pada paragraf sebelumnya.



Kenyataanya pada setiap hasil pembakaran tidak hanya menghasilkan  $CO_2$   $H_2O$ , dan  $N_2$  saja, tetapi bisa menghasilkan  $NO_x$ , CO dan lain-lain.

Pada saat pembakaran, jika kelebihan oksigen maka  $NO_2$ (Nitrogen dioksida) dapat terbentuk, sebaliknya jika kekurangan oksigen maka NO akan terbentuk. Adapun pada CO, terbentuk jika pembakaraan kekurangan oksigen, begitu pula sebaliknya.

### 2.3.2 Air Fuel Ratio

*Air fuel ratio* adalah rasio perbandingan antara jumlah mol atau massa dari udara dan bahan bakar pada suatu reaksi. AFR memegang peranan penting dalam pembakaran, juga dalam pembentukan nyala api dan emisi gas buang. Adapun persamaan AFR stoikiometri dapat dituliskan sebagai berikut :

$$AFR_{stoic} = \left( \frac{N_{udara}}{N_{bahan\ bakar}} \right)_{stoic} \quad 2-1$$

$$AFR_{stoic} = \left( \frac{M_{udara}}{M_{bahan\ bakar}} \right)_{stoic} \quad 2-2$$

(K.K. Kenneth, 2005 :39)

Keterangan :

$AFR_{stoic}$  : Perbandingan udara dan bahan bakar dalam keadaan stoikiometri.

$N_{udara}$  : Banyaknya mol udara.

$N_{bahan\ bakar}$  : Banyaknya mol bahan bakar.

$M_{udara}$  : Massa udara.

$M_{bahan\ bakar}$  : massa bahan bakar.

Berdasarkan persamaan persamaan 2-2 diatas, dapat dihitung AFR dari bahan bakar butana ( $C_4H_{10}$ ) pada keadaan stoikiometrinya sebagai berikut :

Diketahui :

- Reaksi pembakaran butana



- Massa atom relatif (ARr):  
C = 12, H = 1, O = 16, N = 14
- Persamaan stoikiometri butana ( $C_4H_{10}$ ) berdasarkan massa

$$AFR_{stoic} = \frac{(6,5 \times 16 \times 2) + (6,5 \times 3,76 \times 14 \times 2)}{(12 \times 4) + (10 \times 1)} = \frac{892,32}{58}$$

$$AFR_{stoic} = 15,38 \frac{gr_{udara}}{gr_{bahan\ bakar}}$$

Bilangan Damköhler (Da) adalah perbandingan antara laju reaksi dan laju difusi, kegunaan dari bilangan Damköhler adalah sebagai penentu apakah pembakaran akan selesai pada ruang pembakaran dari *micro device*. Ini sangat

dibutuhkan, karena waktu reaksi lebih kecil dari waktu fisik. Nilai dari bilangan Damköhler (dasar eter pada waktu tinggal atau waktu difusi) sangat penting untuk menentukan apakah pembakaran akan selesai pada ruang pembakaran pada *micro device* sejak itu sangat dibutuhkan bahwa waktu reaksi lebih kecil dari waktu fisik. Adapun persamaannya dapat dituliskan seperti dibawah ini :

$$Da = \frac{\text{Reaction rate}}{\text{Diffusion rate}} = \frac{\text{Diffusion time}}{\text{Reaction time}} \quad 2-3$$

### 2.3.3 Rasio Ekuivalen ( $\phi$ )

Rasio ekuivalen adalah perbandingan AFR stoikiometri dan AFR aktual. Rasio ekuivalen pada umumnya digunakan untuk mengindikasikan menurut banyaknya apakah campuran bahan bakar-*oxidizer* kaya, kurang, atau stoikiometri (Turns, S R, 2000). yang dimana dapat dituliskan dalam persamaan seperti dibawah ini :

$$\text{Rasio ekuivalen} = \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{aktual}} \quad 2-4$$

(Stephen R. Turns, 2000 : 19)

Rasio ekuivalen menentukan kaya atau tidaknya suatu campuran bahan bakar dan udara. Adapun  $\phi < 1$  maka campuran kekurangan bahan bakar dan melimpahnya kandungan udara yang menyebabkan campuran menjadi miskin.  $\phi > 1$  maka campuran kelebihan bahan bakar dan kandungan udara menjadi sedikit yang menyebabkan campuran menjadi kaya, dan menyebabkan timbulnya CO dan H<sub>2</sub>. Adapun kondisi sempurna jika AFR<sub>stoic</sub> sama dengan AFR<sub>aktual</sub> yang artinya  $\phi=1$ , pada kondisi ini akan terjadi nilai maksimum *adiabatic flame temperature* karena jumlah *oxider* sangat cukup untuk membakar sejumlah bahan bakar.

### 2.3.4 Pembakaran *Premixed*

Pembakaran menurut jenis dimana bahan bakar dan udara dicampur terlebih dahulu sebelum menuju ruang pembakaran dibagi menjadi dua, yaitu pembakaran *premixed* dan difusi. Menurut jenis alirannya keduanya memiliki dua jenis pula, yaitu nyala laminar dan nyala turbulen. Pada kondisi ini, nyala dapat dibagi menjadi dua jenis utama, nyala *premixed* dan nyala difusi, tergantung pada apakah bahan bakar dan udara dicampur sebelum pembakaran atau dicampur secara difusi ke dalam nyala. Bergantung kepada kecepatan alirannya kedua tipe nyala api dapat dibagi lagi menjadi laminar atau turbulen (Lefebvre & Ballal, 2010).

Pembakaran *premixed* adalah pembakaran yang dimana udara dan bahan bakar bercampur terlebih dahulu sebelum memasuki daerah pembakaran. Nyala *premixed* dimana reaktan dicampur sebelum mendekati daerah nyala, nyala ini hanya dapat diperoleh jika campuran bahan bakar dan udara awal berada di antara batas komposisi tertentu yang disebut dengan komposisi batas *flammability limit* (El-Mahallawy & El-Din Habik, 2002).

Api *premixed* terbagi menjadi 2 jenis, yaitu nyala laminar dan nyala turbulen. Pada penelitian *meso-scale* ini, aliran yang terjadi didalam tabung adalah laminar. Dari persamaan konservasi nondimensional, sangat jelas sekali bahwa, dibandingkan dengan dengan sistem *macroscale*, *microcombustor* beroperasi di bawah bilangan Re ( $U/\alpha$ ), dimana U adalah karakteristik kecepatan aliran pada sistem dan  $\nu$  dan  $\alpha$  adalah kinematik dan difusivitas suhu (Glassman & Yetter, 2008). Menstabilkan nyala api khususnya nyala laminar tidak cukup hanya dengan mengalirkan gas dan udara saja, dibutuhkan *flame holder* atau *burner* untuk

membuat nyala api menempel padanya, flame holder atau burner diletakkan pada area dimana adanya interaksi antara aliran dengan proses pembakaran. Seperti yang telah dijelaskan diatas, mencoba untuk menstabilkan api sederhana dengan mengalirkan gas ke dalamnya pada kesetaraan dan kecepatan yang berlawanan dengan kecepatan pembakaran tidak dapat menghasilkan nyala yang stabil. Maka dari itu perlu menempelkan api pada *flame holder* atau *burner*, yang di mana ditempat itu, terjadi interaksi aliran dengan proses pembakaran membuat kestabilan nyala api dapat terjadi (El-Mahallawy & El-Din Habik, 2002).

## 2.4 Butana

Butana atau  $C_4H_{10}$  merupakan senyawa yang termasuk dalam gugus rantai alkana, yang dimana memiliki jumlah atom karbon (C) sebanyak empat buah dan 10 atom hidrogen (H) dengan struktur  $CH_3CH_2CH_2CH_3$ . Adapun nama butana digunakan juga sebagai istilah kolektif untuk n-butana, isobutana (metilpropana), butana sangat mudah terbakar, tidak berwarna, dan gas yang mudah dicairkan. Penggunaannya dalam bidang konversi energi sangatlah luas, seperti bahan bakar pada korek api. Adapun database dari butana dapat dijelaskan sebagai berikut :

Rumus kimia	: $C_4H_{10}$
Massa molar	: 58,12 g/mol
Wujud	: gas, tidak berwarna
Densitas	: 2,48 kg/m <sup>3</sup> , gas (15° C, 1 atm) 600 kg/m <sup>3</sup> , cair (0° C, 1 atm)
Titik lebur	: -138,4° C (135,4 K)

Titik didih	: -0,5° C (272,6 k)
Kelarutan dalam air	: 6,1 mg/100 ml (20° C)
Titik nyala	: -60° C
LHV	: 45,35 Mj/Kg
HHV	: 49,5 Mj/Kg

## 2.5 Flammability Limit

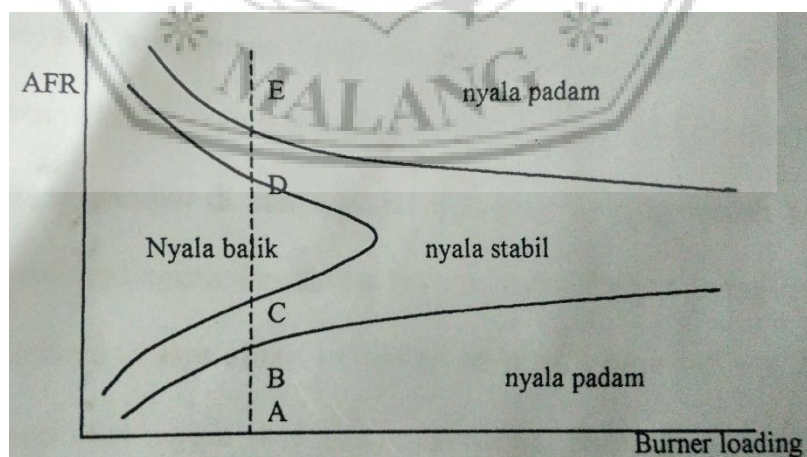
*Flammability limit* dapat diartikan sebagai batas atas dan bawah dari konsentrasi campuran bahan bakar dan udara, yang dapat terbakar pada temperatur dan tekanan standar. Api dapat menyala pada campuran bahan bakar dan udara pada komposisi batas tertentu. Tidak semua campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar dan meledak, nyala dapat merambat melalui campuran bahan bakar dan udara hanya pada komposisi batas tertentu (A. Lefebvre, D. Ballal, 2010). Jika bahan bakar dalam jumlah kecil yang dicampur dengan udara dan ditambahkan secara bertahap, titik dimana api mulai dapat menyala inilah yang disebut dengan *lower flammable limit*, *weak limit* atau *lean limit*. Begitu juga ketika bahan bakar ditambahkan sampai campuran tidak dapat terbakar lagi, maka titik ini disebut dengan *upper flammable limit* atau *rich limit*. Untuk berbagai macam bahan bakar, *weak limit* sesuai dengan rasio ekuivalen sekitar 0,5 dan *rich limit* pada rasio ekuivalen sekitar 3 (A. Lefebvre, D. Ballal, 2010).

*Flammability limit upper* dan *lower* hanya dapat ditentukan setelah meninjau kestabilan nyala api yang dapat diamati dari fenomena *flash back*, *lift off* dan *blow off*. Adapun istilah *flash back* adalah apabila kecepatan pembakaran lebih besar dari

kecepatan bahan bakar gas/ udara sehingga nyala kembali ke *flame holder*, *lift off* terjadi apabila nyala tak menyentuh *flame holder*, akan tetapi nyala lebih stabil, adapun *blow off* terjadi apabila kecepatan bahan bakar gas/ udara lebih besar dari kecepatan pembakaran dan ditandai dengan padamnya api.

Stabilitas nyala dipengaruhi oleh internal (*internal stability factor*) adalah faktor kimia yaitu akibat dari rasio campuran bahan bakar dan udara, laju reaksi, kecepatan bahan bakar dan udara dari berbagai jenis bahan bakar. Adapun dari faktor eksternal (*eksternal stability factor*) yaitu faktor fisika seperti hidrodinamika ( pola aliran, konfigurasi aliran, dll), temperatur dalam memulai penyalaan, dan juga perpindahan panas yang terjadi termasuk *heat losses*.

Grafik *flammability limit* digunakan untuk mengetahui batas bawah dan batas atas titik nyala suatu bahan bakar dan udara. Adapun diagram kestabilan karakteristik nyala digunakan pada semua bahan bakar dan oksidator, yang menggambarkan batasan-batasan *flash back*, *blow off*, dan *blow out*, dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.9 Diagram fuidge.

Titik A dan C menghubungkan batas bawah dan batas atas daerah nyala. Setelah titik C, suatu nyala yang stabil pada lubang pembakar akan terjadi karena

adanya diffusi udara dari atmosfer, dari titik K ke titik B kecepatan pembakaran melebihi kecepatan aliran campuran gas, maka akan terjadi *flash back*. Nyala stabil akan terjadi pada *flame holder* untuk kecepatan aliran antara B dan J, diatas titik J kecepatan aliran melebihi kecepatan pembakaran sehingga nyala *blow off* terjadi. Pada campuran kaya (ditunjukkan pada titik L sampai M) nyala stabil yang terjadi akan menyerupai nyala difusi. Pada titik N, nyala api stabil pada jarak tertentu di atas bagian pembakaran ini, disebabkan campuran yang kaya itu menjadi kurang kaya dan mengakibatkan kecepatan pembakarannya meningkat dan kecepatan aliran menurun, nyala-nyala ini disebut sebagai nyala terangkat.

Apabila kecepatan aliran tinggi, aliran akan menjadi turbulen, kecepatan pembakaran turbulen selalu tinggi daripada kecepatan pembakaran laminar, karena nyala yang terangkat stabil akan terjadi dimana aliran laminar berubah menjadi aliran turbulen. Bila kecepatan aliran ditingkatkan lagi maka akan terjadi *blow out* (pada titik O).

Selain diagram fuidge, ada metode lain yang sangat mudah dan sangat berguna dalam membandingkan kestabilan nyala pada gas-gas, yaitu dengan menghitung rasio udara/bahan bakar dengan laju aliran campuran pada saat blow off dan blow out terjadi. Batas kestabilan nyala kemudian digambarkan pada grafik antara rasio ekuivalen udara / bahan bakar dengan laju aliran campuran.

Adapun burner loading secara ideal dapat dituliskan sebagai berikut :

$$BL = \frac{Vg \times NKB}{A} \text{ ( MW / m}^2\text{)} \quad (2-5)$$

Dimana :



NKB : Nilai Kalor Bawah Butana = 45,35 MJ/Kg

$V_g$  : Laju aliran Gas ml/s

$V_u$  : Laju aliran udara, ml/s

$A$  : luas penampang tabung pembakar,  $m^2$

## 2.6 Temperatur Nyala

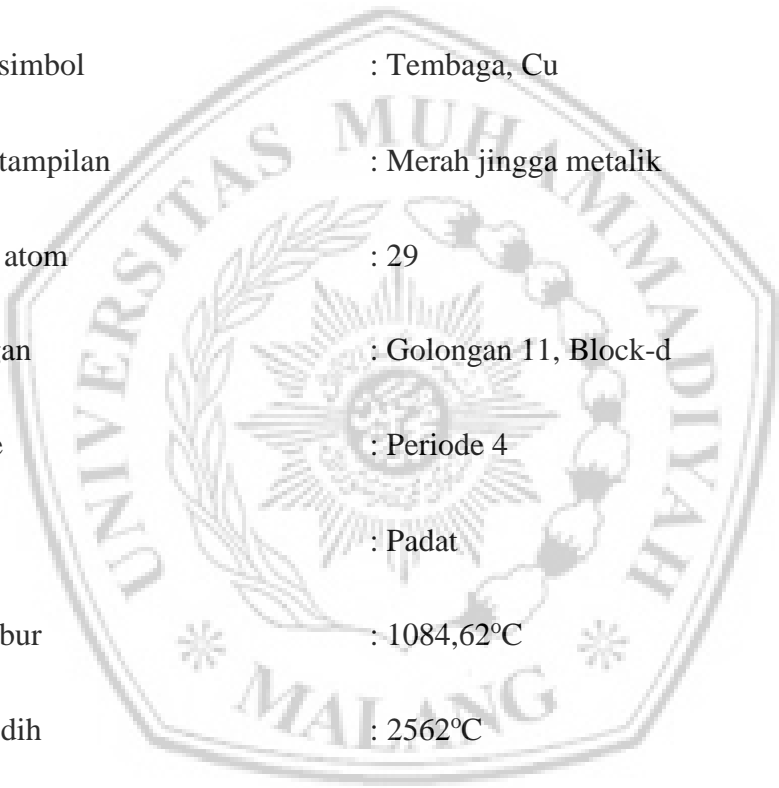
Temperatur nyala adalah temperatur maksimum yang dapat dicapai pada suatu nyala api yang diberikan oleh bahan bakar dan udara. Temperatur pembakaran akan semakin meningkat jika presentase oksigen meningkat, dapat dilakukan dengan menambah molekul oksigen, atau dengan mengurangi jumlah molekul nitrogen diudara. Penggunaan udara sebagai oksidator dapat menurunkan temperatur pembakaran, karena sejumlah panas akan terserap oleh  $N_2$ . Temperatur nyala meningkat secara signifikan ketika udara diganti dengan oksigen murni, karena nitrogen ( $N_2$ ) bertindak sebagai pengencer yang menurunkan temperatur nyala (Baukal. Jr, 1998).

Temperatur nyala adiabatik adalah temperatur teoritis maksimum yang dapat dicapai dalam suatu reaksi pembakaran, dengan asumsi tidak ada panas yang hilang secara konduksi, konveksi maupun radiasi.

## 2.7 Tembaga

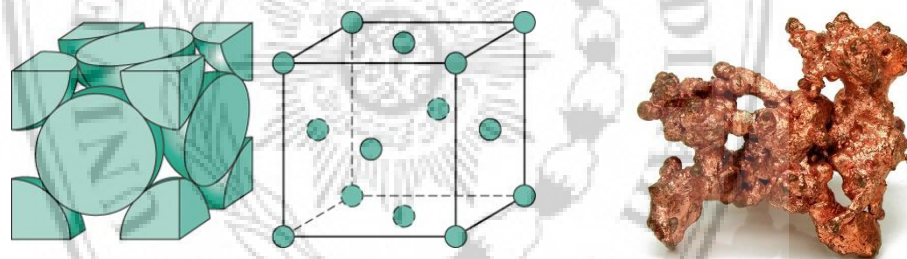
Tembaga (Cu) adalah unsur kimia yang memiliki lambang Cu dengan nomor atom 29. Lambang Cu yang berarti cuprum berasal dari bahasa latin. Tembaga merupakan salah satu logam transisi. Tembaga memiliki sifat lunak dan halus, dan merupakan konduktor panas dan listrik yang baik setelah perak. Tembaga, perak,

dan emas pada tabel periodik merupakan unsur golongan 11 dan memiliki sifat yang sama, yaitu mempunyai satu elektron orbital s pada kulit atom d dengan sifat konduktivitas listrik yang baik. Sifat lunak tembaga dapat menjelaskan tingginya konduktivitas listrik ( $59,6 \times 10^6$  s/m) dan juga memiliki konduktivitas tertinggi kedua diantara logam murni pada suhu kamar. Warna tembaga murni merah orange dan menjadi kemerahan jika kontak dengan udara. Adapun database dapat disajikan sebagaimana berikut :



Nama, simbol	: Tembaga, Cu
Warna tampilan	: Merah jingga metalik
Nomor atom	: 29
Golongan	: Golongan 11, Block-d
Periode	: Periode 4
Fase	: Padat
Titik lebur	: 1084,62°C
Titik didih	: 2562°C
Kepadatan (suhu kamar)	: 8,94 g/cm <sup>3</sup>
Kalor peleburan	: 13,26 kJ/mol
Kalor penguapan	: 300,4 kJ/mol
Kapasitas kalor molar	: 24,440 J/(mol-K)
Bilangan oksidasi	: +1,+2,+3, +4 sedikit oksida basa

Elektronegativitas	: Skala pauling : 1,90
Ekspansi kalor	: $16,5 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pada suhu $25^\circ\text{C}$
Konduktivitas thermal	: $401 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Resistivitas	: $16,78 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ (suhu $20^\circ\text{C}$ )
Modulus young	: 110-128 Gpa
Modulus shear	: 48 Gpa
Modulus bulk	: 140 Gpa
Skala mohs	: 3,0
Struktur kristal	: FCC



Gambar 2.10 Struktur kristal FCC (kiri), tembaga murni (kanan).

Sumber : anonymous

## 2.8 Stainless Steel

Stainless steel adalah logam paduan besi, mengandung minimum 10,5% chromium, dan merupakan baja tahan terhadap pengaruh oksidasi. Stainless steel dapat bengkok/ melengkung oleh ekspansi *thermal* dan paparan panas yang tinggi. Ada 5 pengelompokan kelas stainless steel yang akan dijelaskan sebagaimana berikut :

**a) Ferritic stainless steel**

Ferritic stainless steel memiliki kandungan kromium sebanyak (11,2-19%) dengan sangat sedikit sekali penambahan. Adapun ketahanan ferritic meningkat pada temperatur tinggi (800°C-1150°C). Kelas ferritic bersifat magnetik.

**b) Martensitic stainless steel**

Martensitic adalah kelas yang sangat sedikit pada stainless steel atau jumlahnya dalam produksi sangat sedikit. Untuk meningkatkan kekerasan pada baja paduan ini, martensitic memiliki kandungan karbon yang tinggi diantara kelas yang lainnya, dan nitrogen terkadang ditambahkan untuk meningkatkan kekuatannya lagi.

**c) Austenitic stainless steel**

Austenitic adalah kelompok yang terbesar dalam stainless steel dengan kata lain jumlah produksinya sangat banyak, dan dapat dibagi menjadi 5 sub grup antara lain, Cr-Mn, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, *performance* austenitic, dan kelas austenitic temperatur tinggi. Adapun pada sub grup kelas austenitic temperatur tinggi, dirancang terutama untuk penggunaan pada temperatur melebihi 550°C.

**d) Duplex stainless steel**

Duplex memiliki mikrostruktur ferritic-austenitic, dengan fasa seimbang kira-kira 50% ferrit dan 50% austenit. Kelas duplex banyak menggabungkan keuntungan propertis dari ferritic dan austenitic stainless steel. Mikrostruktur duplex juga berkontribusi pada kekuatan dan ketahanan terhadap korosi retak yang tinggi, dan memiliki kandungan kromium (20.1-

25,4%) dan memiliki kandungan nikel yang sedikit (1,4%-7%) dibandingkan dengan austenitic.

e) ***Precipitation hardening stainless steel***

Stainless steel ini memiliki kekerasan dengan mekanisme spesial meliputi formasi dari persipitasi dalam mikrostruktur dan bersifat magnetik.

(Sumber : *american welding society* (AWS D1.6/D1.6M), 2007 dan handbook of stainless steel Outokumpu, 2013).

